

빙하의 녹음이 해양환경에 미치는 영향 (Impact of ice melt on marine environment)

신임철¹, 이희일², 정효상¹, 권원태¹, 천중화²

¹기상연구소 기후연구실, ²한국해양연구원 해저환경 자원 연구본부

1. 서론

본 연구의 목적은 과거의 기후변화와 이산화탄소 농도와의 상관관계를 검토하며 현재 전 지구 온난화로 인한 빙하의 녹음이 해양생태계에 미치는 영향을 기술하고자 함이다. 지구의 기후 및 환경은 지구의 역사 45 억년 이후로 수 없이 급격히 변해왔다. 지질연대표에 의하면 고생대, 중생대, 신생대의 경계면은 생물체의 멸종 및 급격한 환경변화에 의해서 경계 지워진다. 이러한 경계면은 나중에 밝혀진 사실이지만 급격한 기후변화가 일어난 시기이기도 하다. 지구생성 이후 해양의 온도는 약 20 C 의 범위 내에서 변해왔다. 이러한 기후변화와 더불어 해수면 변화 및 지자기극의 변화 또한 환경에 변화를 일으켜 생태계에 커다란 변화를 일으키기도 했다. 해수면은 중생대 공룡이 살던 시기에 최대 현재보다 약 400 m 이상 상승한 적이 있었다. 또한 최근의 빙하 최대기인 약 18,000 년 전에는 전 지구적으로 약 150 m 하강한 적도 있다. 지자기의 극은 normal 과 reversal을 되풀이 하면서 변해왔다.

기후변화에 관한 정부간 협의회(IPCC)에서 기후변화가 2100년까지 약 1.4-5.8℃ 정도 상승할 것 이란 시나리오를 발표하고 있다. 기후계가 온난에서 한랭으로 변하든 아니면 한랭에서 온난으로 변하든 기후가 변하는 시기를 기후 전이시기라 한다. IPCC의 예측된 모델에 의하면 우리는 현재 기후가 전이되는 시기에 살고 있다.

고기후의 결과에 의하면 지구생성 이후로 기후변화의 양태는 크게 3가지가 있다. 이들 3가지는 점진적인 변화(gradual), 계단형태의 변화(step-wise), 급격한 변화(abrupt)이다. 점진적인 변화는 시간에 따라 서서히 기후가 변하는 형태를 말하며 생태계의 급격한 변화를 초래하지는 않는다. 계단형태의 기후변화는 일정시간동안 기후변화가 거의 없다가 급격한 기후변화가 일어나는 형태이다. 이러한 형태의 기후변화에서는 종의 멸종이 선택적으로 일어남이 특징이다. 급격한 기후변화는 수 년-수 십 년 이내에 기후변화가 급격히 일어남이 특징이다. 일반적으로 급격한 기후 변화란 100 년간 약 2-3 ℃ 정도의 온도차를 의미한다.

고기후학의 관점에서 보면 급격한 기후변화가 일어나는 시기에 많은 기상이변이 빈발하며 생태계의 멸종을 초래하기도 했다. 기후변화의 원인에는 화산활동, 태양의 활동, 판구조론에 의한 해양과 육지면적의 변화 등 여러 학설이 있다.

2. 과거의 이산화탄소 농도와 기후변화

적어도 과거 5억 년간 전 지구의 대기의 온도와 기후를 통제하는 주 요소는 대기 중의 이산화탄소의 농도였다 (Kurschner, 2001). 하지만 육지의 형태변화, 지형(산맥의 형성), 표층수 및 저층수의 순환변화, 지축 및 지축의 각도변화, 태양의 밝기변화 등도 또한 다른 시간 및 다른 지역에서 기후변화에 많은 영향을 미친다.

이산화탄소, 메탄, 수증기, 이산화질소, 염화불화탄소, 오존을 온실기체라 한다. 이중 이산화탄소와 메탄이 기후변화에 가장 커다란 영향을 미친다. 대기 중의 이산화탄소의 농도는 2차 세계대전 이후로 관측되기 시작했으나 체계적인 관측은 1958년 이후부터다. 남극의 빙하코어의 연구에 의하면 인간의 영향을 받기 전의 이산화탄소의 농도는 260 ppmv 이하였다 (Raynaud and Barnola *et al.*, 1985). 현재는 370 ppmv 이다. 이는 빙하기와 간빙기 동안의 이산화탄소의 농도 변화차이(100 ppmv)에 해당한다.

과거 400,000 년간의 대기의 온도, 이산화탄소와 메탄의 농도 및 대기의 일사량의 변화는 남극의 빙하코어에서 연구가 잘 되어있다. 다행히도 과거 약 400,000 년간의 대기는 빙하의 기포 속에 함유되어있기 때문에 과거의 대기분석을 통한 이산화탄소 및 메탄의 측정이 가능하다(Petit *et al.*, 1999). 과거 400,000 년간 대기 중의 이산화탄소의 농도는 약 180-300 ppmv 사이였으며 메탄의 농도는 약 380-700 ppbv 이었다. 과거 400,000 년간 급격한 온도 변화는 몇 번 나타나며 전구 대기의 온도차는 약 8 °C 범위 내에서 변했다(Petit *et al.*, 1999).

과거에 기후변화가 있었을 때 이산화탄소의 농도를 살펴보자. 우선 수 억 년 전은 해양과 육상의 분포가 현재와는 완전히 달랐으며 이산화탄소의 농도도 2000ppmv 이상이였다. 과거 약 125,000 년 전에는 대기 중의 이산화탄소의 농도가 약 240-280 ppmv 이었다. 이때 해수의 표면온도는 현재보다 약 2 °C 정도 높았다. 현재 과학계에서는 IPCC에서 예측한 2100 년의 상태가 125,000 년 전의 기후 및 환경과 비슷할 것이란 연구결과가 발표되고 있다. 물론 이에 대한 반론도 많은 연구가 있다. 125,000 년 전에는 서남극의 얼음이 완전히 녹아 없어졌으며 해수면은 현재보다 약 7.5±1.5 m (이는 IPCC 예측보다 매우 높은 수치이다) 높았다. 18,000 년 전은 지구상에 빙하가 최대에 이른 시기(빙하의 부피가 현재의 두 배)였으며 해수의 온도는 오늘날보다 5 °C 정도 낮았으며 이산화탄소의 농도는 과거 400,000 년의 기간 중 가장 낮은 수치인 180 ppmv 이었다. 약 12,000 년 전은 빙하에서 간빙기로 바뀌는 시기였으며 이산화탄소의 농도는 250-260 ppmv 이었다. 약 6000 년 전은 표층

수의 온도가 오늘날보다 약 1 °C 정도 높았으며 이산화탄소는 270 ppmv 이었다. 500-1000 년 전은 중세온난시기이며 표층수의 온도는 오늘날보다 약 1 °C 높았으며 이산화탄소는 280 ppmb 정도였다. 1900AD부터 1560AD 사이를 소빙하기라 부르며 표층수의 온도는 오늘날보다 0.4-1 °C 정도 낮았으며 이산화탄소는 270-300 ppmv 이었다. 1901AD부터 2000AD 사이는 오늘날보다 온도가 약간 낮았으며 이산화탄소의 농도는 300-340 ppmv이었다. 위에서도 언급했지만 현재는 370 ppmv 정도이다.

기후변화에 관한 정부간 협의회(IPCC)의 2001 년도 보고서에서 예측한 최대 약 6 °C 상승은 과거 약 400,000 년간 몇 번 일어났지만 이산화탄소의 농도가 현재까지의 연구결과에 의하면 현재처럼 높은 적(370 ppmv)은 없었다. 현재까지 출판된 대부분의 많은 연구결과에 의하면 이산화탄소의 농도와 기후변화는 좋은 상관관계를 보인다. 하지만 이산화탄소의 농도와 온도변화의 상관관계가 잘 맞지 않는다는 결과들도 있다(Lorius *et al.*, 1985; Fischer *et al.*, 1999).

어쨌든 급격한 기후변화의 전환기 특징 중의 하나인 기후변화의 커다란 변동성과 불안정성은 사회 및 경제의 구조에 심각한 영향을 미친다(Humle *et al.*, 1999). 예를 들어 강수량 변화, 홍수, 가뭄, 해수면변동, 생물다양성변화, 바람의 강도변화, 생태계 변화, 생산성 변화, 생물학적인 질병 등은 모두 기후변화와 직접적인 관련이 있다. 앞으로 변할 기후변화에 대한 대비는 우리사회가 앞으로 변영 쪽으로 가느냐 혹은 불행 쪽으로 가느냐를 결정할 것이다.

몇 년 전만 해도 미국과 캐나다는 이산화탄소의 흡수원(주로 산림)이 있기 때문에 이산화탄소의 방출을 억제할 필요가 없다고 생각했다 (Kaiser, 1998). 하지만 이산화탄소의 흡수원의 존재는 중요하지 않다. 정말 중요한 것은 이산화탄소의 증가에 의한 이러한 흡수원의 변화와 (Kaiser, 1998) 해수순환 및 생태계(육상, 해양)의 급격한 변화인 것이다.

3. 빙산의 녹음이 생태계에 미치는 영향

현재 지구온난화로 인하여 빙하가 녹고 있다. 그러면 빙하가 녹으면 과연 환경에 어떤 영향을 미치게 될까? 그동안 빙하는 쉽게 녹지 않는 게 지금까지 과학계의 생각이었다. 하지만 그 빙하가 이제 녹고 있다.

남극에서 채취한 빙하코아의 분석에 의하면, 과거 40만년간 대기의 온도가 약 6 °C 이상 상승한 경우는 12,000 년 전, 125,000 년 전, 250,000 년 전, 370,000 만 년 전등 여러 번 있었으며 (Petit *et al.*, 1999) 약 2 °C 정도의 온도 변동은 그보다 더 많이 일어났다. 이산화탄소와 메탄의 농도 또한 고기후의 변화와 평행한 관계를 보인다. 우리는 지금 매우 특이한 기후의 전환기에 살고 있다. 고기후의 증거에 의하면, 이러한 전환기에 여러 가지 이상기후 현상들이 불규칙적으로 발생하며, 이에 적응하지 못한 동물과 식물들은 개체수가 급격히 줄어든다. 또한 생물다양성의 급격한 변화가 오거

나 중 자체가 멸종되기도 한다. 이러한 현상은 곧바로 생물자원의 감소로 이어지게 된다 (Pfisterer and Schmid, 2002).

그러면 온난화로 인해 지구상의 만년설과 빙하가 녹으면 생태계에는 어떤 현상이 일어날까? 가장 심각한 영향중의 하나는 심층수 순환의 붕괴이다. 염분을 함유하지 않은 눈과 빙하의 녹은 물이 강을 거쳐 바다로 가면, 염도가 낮은 물은 수심이 깊은 곳으로 가라앉지 못하게 된다. 해수의 순환에는 표층수의 순환과 심층수의 순환이 있다. 표층수의 순환은 바람이 해양의 표층을 때릴 때 일어나며, 심층수의 순환은 염도(염분)의 차이에 의해서 일어난다. 즉, 차갑고 염도가 높은 표층의 물은 무겁기 때문에 아래로(수심이 깊은 곳으로) 가라 앉는다. 그렇게 표층의 물이 아래로 가라앉으면서 생물체의 생존에 필수적인 온도(열), 염도(소금), 용존산소(물 속에 녹아있는 산소), 영양염 등을 깊은 바다에 수송하게 된다. 해양에서 영양염의 주 공급원은 육상이며 용존산소의 주 공급원은 대기이다. 그런데 이러한 심층수 순환의 붕괴에 의해 저층에 사는 생물체는 죽게 되며 이런 현상이 전 지구적으로 일어나는 것이다. 또한 저층수는 표층으로부터 산소 공급의 중단과 표층에서 떨어지는 유기물의 산화에 의해 산소가 고갈되어 무산소 환경으로 변한다. 생물다양성은 해양의 표층보다 수심이 깊은 곳에서 훨씬 높으므로 이 심층수 순환의 붕괴로 생물다양성의 급격한 감소를 초래하기도 한다.

빙하나 눈이 녹으면 해양의 표층수에는 또 어떠한 영향을 미칠게 될까? 빙하나 눈이 녹은 물은 유기물을 포함하게 되어 육상의 퇴적물, 암석 혹은 광물 파편들이 해양으로 이동됨에 따라 해양표층의 영양분이 풍부하게 된다. 이로 인하여 동물플랑크톤이 급격히 증가하게 되는데 이러한 증가는 표층수의 용존산소를 고갈시켜 생물체가 없는 박테리아만 우글거리는 해양이 된다. 이러한 플랑크톤의 증가는 또한 생물체의 질병을 일으켜 해양생태계에 치명적인 영향을 미칠 수 있다.

또, 빙하가 녹으면 해수면이 상승되며, 상승된 해수면은 강을 범람시키고 저지대에 위치한 많은 섬들을 물에 잠기게 할 것이다. 또한 해수면 상승 및 이상기후에 의한 빈번한 집중호우는 토양의 침식을 야기할 것이다. 이로 인하여 토양 속에 갇혀 있는 이산화탄소가 대기 중으로의 방출되는 양이 증가하여 지구온난화는 더욱 더 심해지게 될 것이다.

또한 빙하나 눈이 녹음으로써 태양광선의 흡수도가 증가하여 (알베도 감소) 지구는 더욱 더 더워질 것이다. 일반적으로 현재 지구상에 살고 있는 생물이 환경에 적응하여 살아남는데 걸리는 시간은, 동물은 적어도 수 십 만년, 식물은 수 천 만년 이상 걸린 적응과 진화의 결과이다. 하지만 급격한 기후변화가 일어나고 있다는 데 문제가 있다. 지구상의 생태계가 급격한 기후변화 및 기후변화에 의해 야기되는 환경변화에 적응할 시간이 없음은 안타까운 일이다.

결론적으로 빙하의 녹음으로 인해 일어나는 해수순환의 붕괴는 전 세계의 육상 및 해양생태계에 심각한 영향을 미친다. 양 극지방의 표층의 물은 일반적으로 저층으로 가라앉아 고위도의 대서양, 태평양, 인도양으로 퍼지며 저층으로 가라앉은 물은 적도를 향하여 일생을 마감하게 된다. 하지만 심층수 순환의 붕괴는 이러한 해수의 흐름이 파괴됨을 의미한다.

4. 요약

빙하의 녹음에 의한 환경변화는 10,000 년 전에 일어났던 급격한 기후변화인 영어드라이아스 (Younger Dryas) 때 일어난 환경변화로 알 수 있다. 빙하의 녹음은 열 염분 순환을 감소 혹은 붕괴시켜 해양을 무산소 환경으로 만들며 생물 다양성을 감소시킨다. 빙하의 녹음에 의한 토양의 침식은 더욱 더 많은 이산화탄소를 대기 중으로 방출시켜 지구 온난화를 더욱더 가속화 시킨다. 또한 전 지구 온난화로 인한 탄산염 보상심도의 깊이 변화는 생태계에 커다란 교란을 야기 시킨다.

감사글

본 연구의 경제적인 지원은 기상연구소 주요사업인 “기후변화 협약대응 지역기후 시나리오 산출 기술개발” 과제의 일원으로 수행되었다.

■ 참고문헌

- Fischer, H., Wahlen, M., Smith, J., Mastroianni, D., and Deck, B., 1999, Ice core records of atmospheric CO₂ around the last three glacial terminations, *Science*, 283, 1712-1714.
- Hulme, M., Barrow, E.M., Arnell, N.W., Harrison, P.A., Johns, T.C., and Downing, T.E., 1999, Relative impacts of human-induced climate change and natural climate variability, *Nature*, 397, 688-691.
- Kaiser, J., 1998, Possibly vast greenhouse gas sponge ignites controversy, *Science*, 282, 386-387.
- Kurschner, W. M., 2001, Leaf sensor for CO₂ time, *Nature*, 411, 247-24.
- Lorius, C., Jouzel, J., Ritz, C., Merlivat, L., Barkov, N.I., Korotkevich, Y.S., and Kotlyakov, V.M., 1985, A 150,000-year climatic record from Antarctic ice, *Nature*, 316, 591-596.
- Petit, J. R., Jouzel, J., Raynaud, D., Barkov, N.I., Barnola, J.-M., Basile, I., Bender, M., Davis, J.C.M., Delaygue, G., Delmotte, M., Kotlyakov, V.M., Legrand, M., Lipenkov, V.Y., Lorius, C., Pepin, L., Ritz, C., Saltzman, E., and Stievenard, M., 1999, Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica, *Nature*, 399, 429-436.
- Pfisterer, A. B., and Schmid, B., 2002, Diversity-dependent production can decrease the stability of ecosystem functioning, *Nature*, 416, 84-86.
- Raynaud, D., and Barnola, J.M., (1985). An Antarctic ice core reveals atmospheric CO₂ variations over the past few centuries, *Nature*, 315, 309-311.